

УДК 622.2.

Кузнецов Игорь Сергеевич, аспирант, ассистент каф. ИиАПС  
(ФИЦ УУХ СО РАН, КузГТУ, г. Кемерово)

Igor S. Kuznetsov, post-graduate student, assistant of ИАПС  
(FRC CCC SB RAS, KuzSTU, Kemerovo)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

## RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS EXCAVATOR-AUTOMOBILE COMPLEX BY MEANS OF SIMULATION

**Аннотация:** В статье представлена усовершенствованная имитационная модель ЭАК созданная с использованием специализированного языка GPSS World на примере участка разреза АО «Черниговец», позволяющая оценивать выходные параметры: производительность, коэффициент использования экскаватора, средний размер очереди автосамосвалов ожидающих экскаватор, при вводе входных параметров: время погрузки горной массы экскаватором в автосамосвалы, количество автосамосвалов и их максимальная грузоподъемность, тонн и показаны часть результатов экспериментов.

**Abstract:** The article presents an improved simulation model of EAC created using a specialized language GPSS World on the example of the section of JSC "Chernigov", which allows to evaluate the output parameters: performance, coefficient of use of the excavator, the average queue size of dump trucks waiting for the excavator, when entering the input parameters: the time of loading the rock mass by the excavator into dump trucks, the number of dump trucks and their maximum load capacity, tons and shows part of the results of experiments.

При поиске резервов повышения эффективности в процессе проектирования и проведения открытых горных работ возникают задачи по согласованию параметров: вместимости ковша экскаватора, количества автосамосвалов и их максимальной грузоподъемности для обеспечения максимальной производительности угледобывающего разреза, при минимальных простоях как организационного, так и технического типов. Поэтому в горном деле все чаще применяют методы математического моделирования. В силу случайного характера производственных процессов (погодные условия, отсутствие транспорта, отсутствие дизельного топлива, изменение ландшафта, перегон экскаватора и т.д.) описать случайное взаимодействие во времени и пространстве множества горных машин, представленных в виде разрешимых систем аналитических уравнений достаточно сложно. Поэтому для моделирования горных работ применяют методы имитационного моделирования, где реальная система представляется в компьютере в виде некоторого алгоритма. [1]

С точки зрения математического моделирования большинство открытых горных работ можно представить в виде дискретных процессов с конечным числом состояний (начало/конец погрузки экскаватором горной массы в автосамосвалы, транспортировка горной массы в пункты разгрузки и т.д.).

Одним из самых мощных математических аппаратов для описания дискретных систем является теория систем массового обслуживания (СМО). Пространственно-временное взаимодействие элементов системы угледобычи открытым способом представлено в виде СМО рис.1, состоящей из однофазной и многофазных, замкнутых СМО без отказов с дисциплиной обслуживания заявок по типу FIFO («Первый пришел – первый обслужился»).



Рисунок 1 – Фрагмент концептуальной модели работы ЭАК

Время выполнения основных операций: погрузка, разгрузка и т.д. отображается случайными задержками заявок (автосамосвалов) в приборах обслуживания, отображающие пункт погрузки – забой с экскаватором, пункты разгрузки – склады, отвалы, перемычки и т.д.

По причине того, что созданная СМО включает в себя разнородные заявки, вероятностно распределяющиеся по различным очередям, аналитическое ее решение затруднено, поэтому применяется язык имитационного моделирования GPSS World. [2]

При переходе от СМО к моделированию на GPSS World, выполнение основных операций происходит как последовательность событий. Заявки (автосамосвалы) в имитационной модели соответствуют транзактам, для этого используются блоки GENERATE, в модели их 3, каждый отдельный блок генерирует отдельную группу автосамосвалов, и в операндах можно задавать: время прихода автосамосвала(ов)., количество автосамосвалов в группе. После ввода транзактов в модель, им необходимо придать некоторые отличительные параметры: максимальная грузоподъемность, номер группы и разрешить экскаватору их обслуживать, задается это блоком LOGIC. Для задания этих параметров используются блоки ASSING количество таких блоков соответ-

ствуется удвоенному количеству блоков GENERATE для каждой группы. Однофазными приборами в модели – экскаваторы, они описываются блоками SEIZE и REALASE, а многофазными являются пункты разгрузки, описываются блоками ENTER и LEAVE, для выполнения операций используются блоки ADVANCE, с распределением временных интервалов по закону Гаусса, а для распределения автосамосвалов в зависимости от группы для выполнения маневровых операция и погрузки используются блоки TEST. Фиксация совершенного рейса автосамосвалом, привезенной горной массы фиксируется блоком SAVEVALUE. Удаление транзактов из модели осуществляется блоком TERMINATE. Количество мест для одновременной разгрузки автосамосвалов в пунктах разгрузки задается командой STORAGE, все значения временен задается командой EQU, а для учета неравномерности погруженной горной массы используется команда FUNCTION. Для учета передачи смены, в модель вводится дополнительный сегмент, в блоке GENERATE генерируется транзакт, время появления которого соответствует длине смены – 12 часов, после происходит блокирование/разблокирование экскаватора с использованием блоков GATE и LOGIC. Время на осуществление пересменки задается блоком ADVANCE, фиксация количества переданных смен фиксируется блоком SAVEVALUE и после доступ к экскаватору разрешается, а сам транзакт удаляется, рис.2.

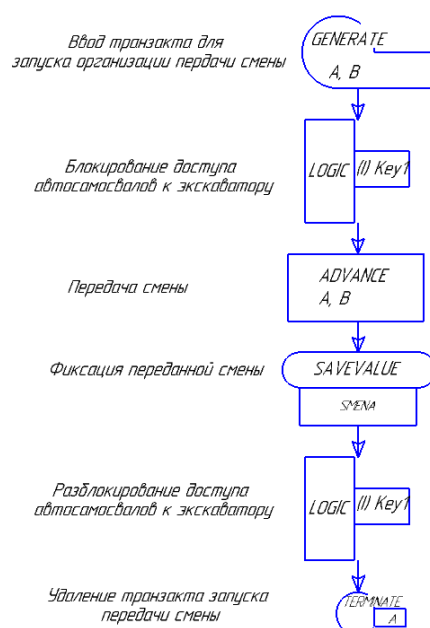
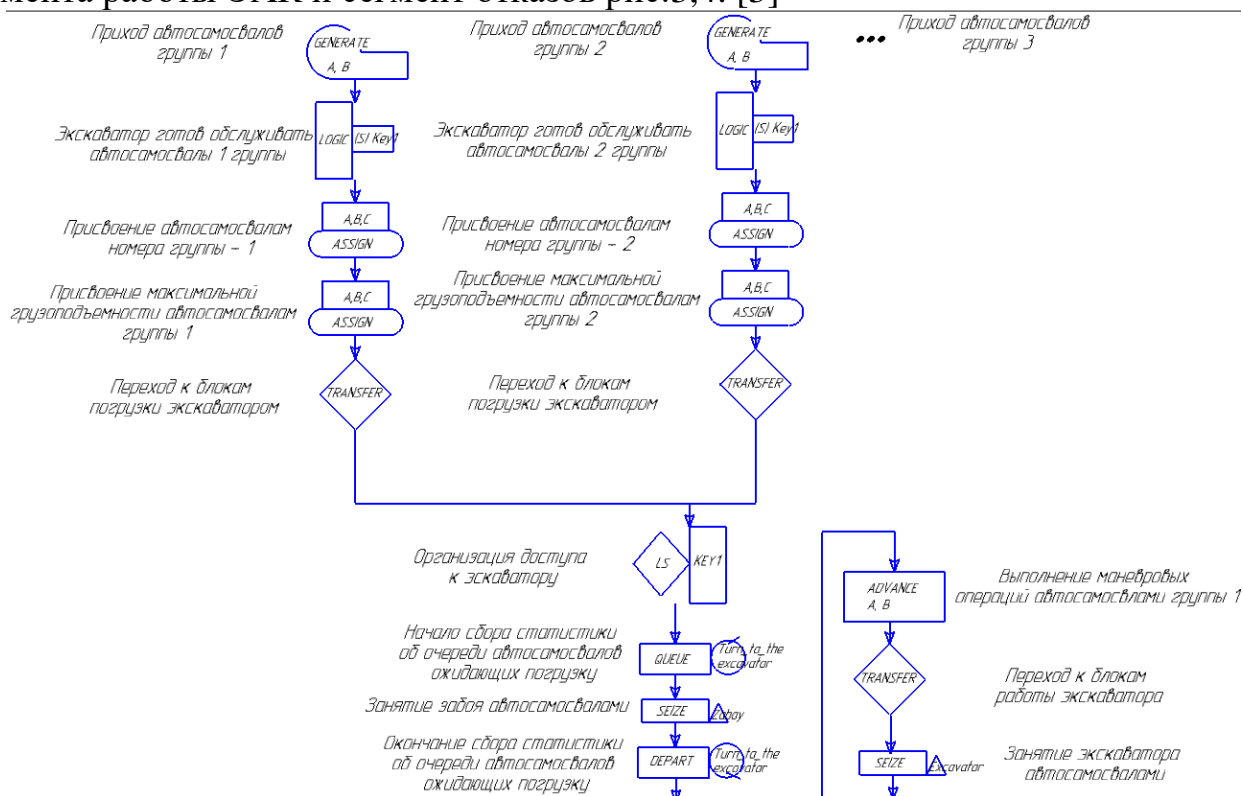


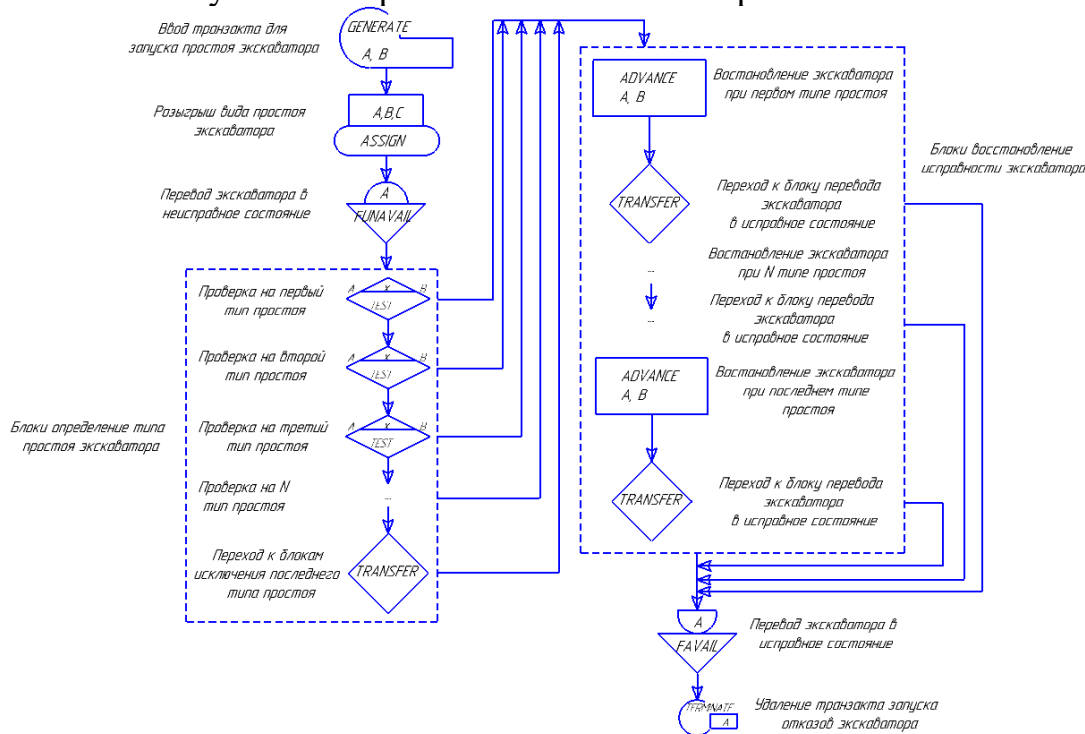
Рисунок 2 – Блок-схема имитации передачи смены

Для учета простоев в модель вводится дополнительный сегмент. В блоке GENERATE сегмента генерируется транзакт, которому присваивается номер простоя с вероятностью, равной вероятности появления такого вида простоев в блоке ASSING, полученной по результатам хронометражных замеров с реального разреза. Время устранения простоя задается в виде его функциональной зависимости с использованием команды FUNCTION от типа простоя и моделируется задержкой транзакта в соответствующем блоке ADVANCE. На время задержки транзакта-простоя блокируется обслуживающее устройство –

экскаватор с использованием блока FUNAVAIL и разблокируется после восстановления исправности блоком FAVAIL в основном сегменте модели, отображающем работу участка разреза с экскаватором. Примеры блок – схемы сегмента работы ЭАК и сегмент отказов рис.3,4. [3]



**Рисунок 3 – Фрагмент блок – схемы работы ЭАК**



**Рисунок 4 – Блок-схема сегмента простоя экскаватора**

В результате проведения оценки адекватности разработанной модели на примере участка разреза АО «Черниговец» установлено, что максимальное

расхождение выходных параметров полученных с реальной системы и выходных параметров полученных с модели составило менее 10%, это позволяет предположить, что данная модель действительно отображает реальную систему и на ней можно проводить эксперименты.

После оценки адекватности имитационной модели, проводились имитационные эксперименты по схеме, рис.5 изменялись: объем ковша экскаватора, количество автосамосвалов, максимальная грузоподъемность, а на выходе оценивались: коэффициент использования экскаватора, суточная производительность участка, и средний размер очереди.



Рисунок 5 – Схема проведения имитационных экспериментов

Список исследуемых вариантов в процессе проведения эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1

Горные машины, рассматриваемая в имитационных экспериментах

Тип техники	Марка техники	Изменяемый параметр		
		Количество, шт.	Объем ковша, м3	Максимальная грузоподъемность, тонн
Экскаватор	Komatsu – PC 1250	1	6	-
	Komatsu – PC 2000	1	12	-
	Komatsu – PC 3000	1	15	-
	Komatsu – PC 750	1	4	-
Автосамосвалы	БелАЗ - 75131	0...3	-	136
	БелАЗ - 75306	0...2	-	220
	НІТАСНІ – ЕН2000	0...2	-	132
	НІТАСНІ – ЕН4000АС3	0...2	-	228

Перед проведением экспериментов, с использованием теории комбинаторики [4], были определены всевозможные комбинации групп автосамосвалов.

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (1)$$

где:

$n$  – количество групп применяемых в модели;

$m$  –общее количество рассматриваемых групп.

Поэтому применив формулу 1, были получены следующие варианты комбинаций групп автосамосвалов, табл. 2.

Таблица 2

Варианты комбинаций элементов

Номер варианта комбинации	Номер элемента (марка автосамосвала)
1	– 1 (БелАЗ - 75131) – 2 (НІТАСНІ – ЕН2000) – 3 (БелАЗ - 75306)
2	– 1 (БелАЗ - 75131) – 2 (НІТАСНІ – ЕН2000) – 3 (НІТАСНІ – ЕН4000АС3)
3	– 1 (БелАЗ – 75131) – 2 (БелАЗ - 75306) – 3 (НІТАСНІ – ЕН4000АС3)
4	– 1 (НІТАСНІ – ЕН2000) – 2 (БелАЗ - 75306) – 3 (НІТАСНІ – ЕН4000АС3)

Для каждой комбинации проводились отдельные эксперименты, часть результатов представлена на рис.6, 7, 8.

Приняты допущения:

- автосамосвалы в момент начала моделирования прибывают на погрузку к экскаватору через 1 минуту;
- выполнение маневровых операций автосамосвалом перед погрузкой не зависит от грузоподъемности, марки автосамосвала и горно-геологических условий;
- применяются автосамосвалы грузоподъемностью только 132, 136, 220 и 228 тонн;
- рассматривались экскаваторы с объемом ковша только 6, 12, 15 и 4 м<sup>3</sup>.

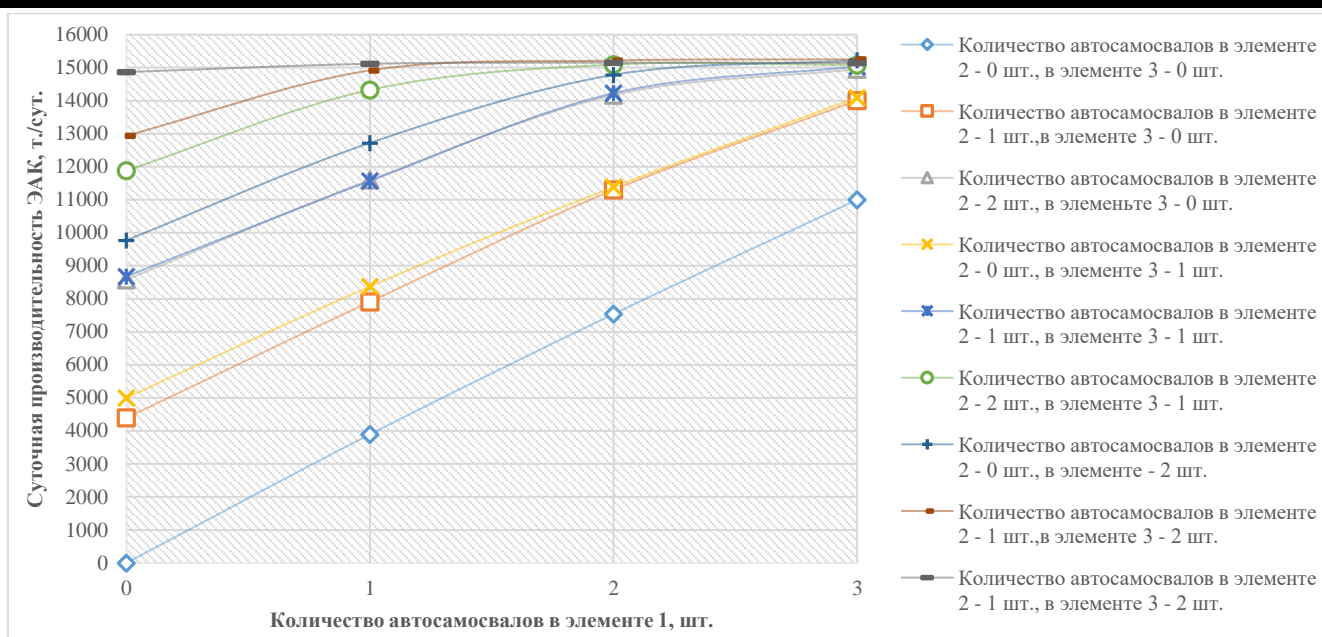


Рисунок 6 – Суточная производительность ЭАК при использовании экскаватора Komatsu PC – 1250 с вариантами комбинаций автосамосвалов

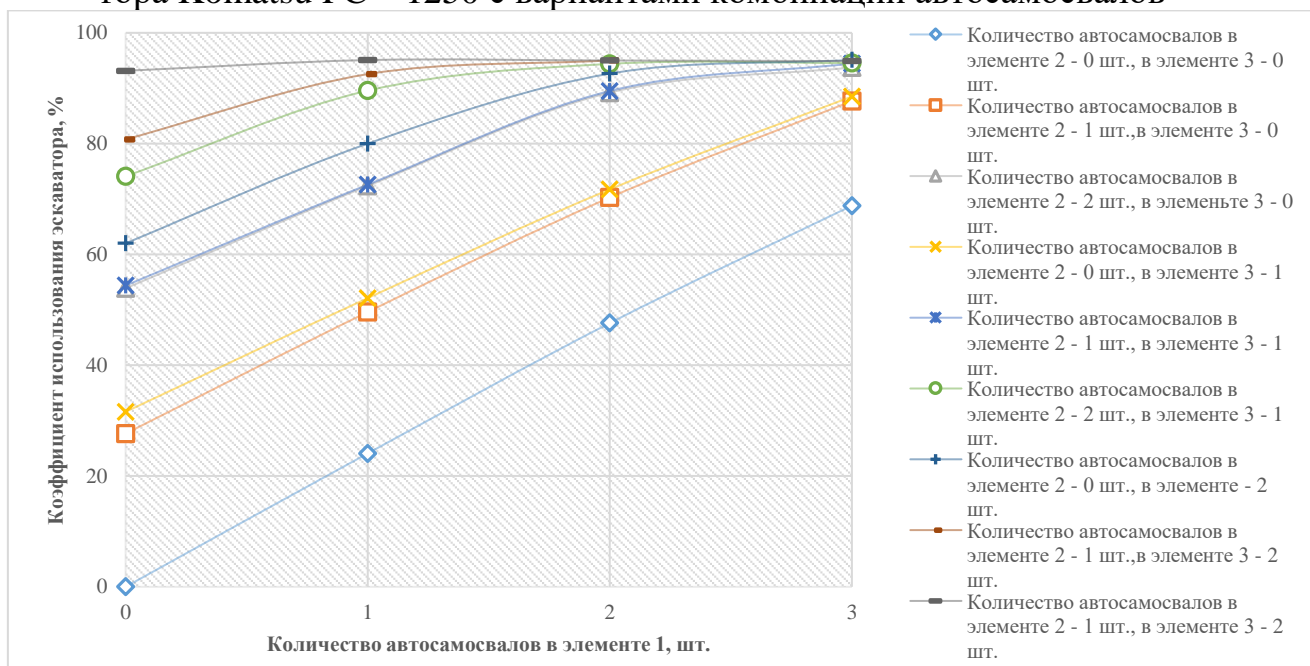


Рисунок 7 – Коэффициент использования экскаватора Komatsu PC – 1250 в ЭАК с вариантами комбинаций автосамосвалов



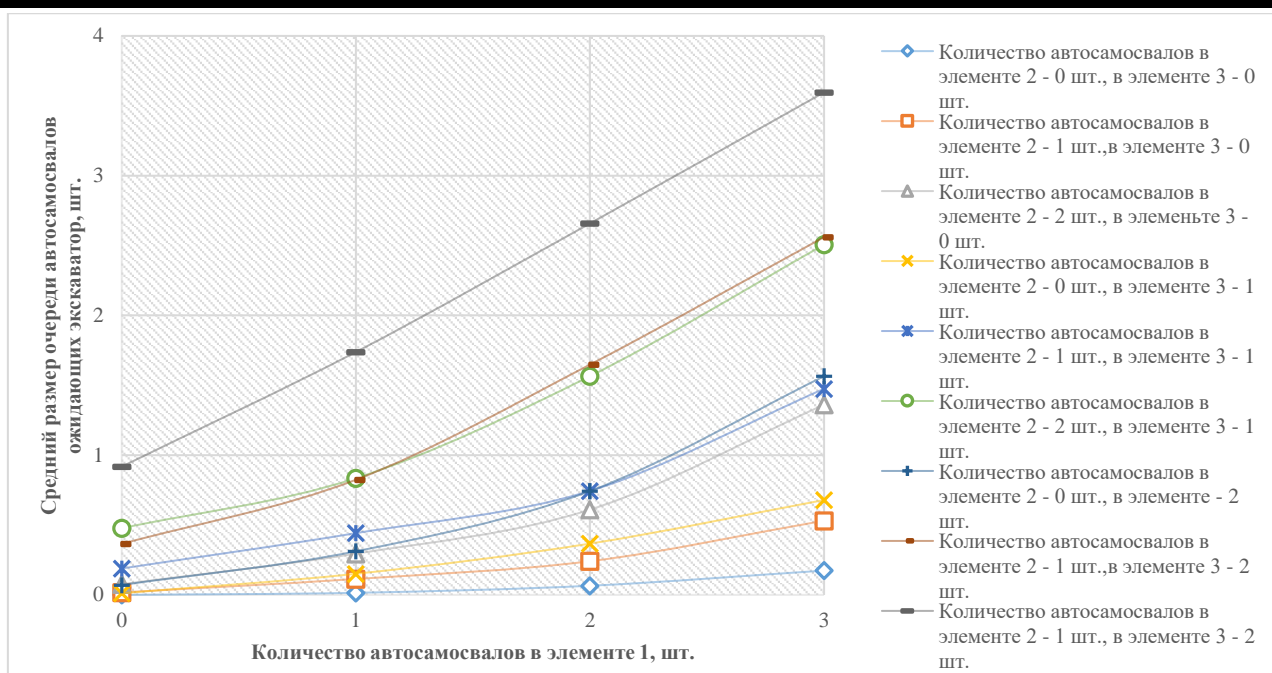


Рисунок 8 – Средний размер очереди автосамосвалов, ожидающих экскаватор Komatsu PC – 1250 в ЭАК с вариантами комбинаций автосамосвалов для погрузки горной массы

Значение производительности ЭАК, средний размер очереди и коэффициент использования экскаватора для сочетания количества элементов, содержащих в себе автосамосвалы различной грузоподъемности определяется пересечением количества автосамосвалов, входящих в элемент комбинации 1 по оси абсцисс, и элементов комбинации 2 и 3, которое выбирается по типу линии графика.

**Вывод:** Разработанная модель является этапом общей методики по определению оптимальной совокупностью горных машин для обеспечения максимальной производительности участка разреза при минимальных простоях и далее полученные результаты анализируются и выбирается оптимальный вариант с применением интегрального критерия оптимизации.

#### Список литературы:

1. **Конюх, В.Л.** Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ / В.Л. Конюх, В.В. Зиновьев. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 243 с.
2. **Девятков В.В.** Имитационные исследования в среде моделирования GPSS Studio: учеб. Пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов; под общ. ред. В.В. Девяткова. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 283 с.
3. **Кузнецов И.С.** Имитационное моделирование экскаваторно-автомобильного комплекса/ И.С. Кузнецов // Сборник материалов X Всероссийской, научно – практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – 2018. – 5 с.
4. **Новиков Ф.А.** Дискретная математика для программистов: Учебник для вузов. 3-е изд. — СПб.: Питер, 2009. — 384 с.: ил. — (Серия «Учебник для вузов»).